

気ほう流の強制対流伝熱に関する研究

(第1報, ボイド率分布と熱伝達係数の実験的關係)

中里見正夫*・田原 和雄**・浜新 正博***

Forced Convective Heat Transfer to Air-Water Bubble Flow

(1. Experimental Results on The Relationship Between Radial Void Fraction Distribution and Heat Transfer Coefficient)

Masao NAKAZATOMI, Kazuo TAHARA
and Masahiro HAMASHIN

Abstract

The relationship between a radial void fraction distribution and a heat transfer coefficient in upward air-water two-phase bubble flows is demonstrated based on the experimental results. The two typical modes in void fraction distribution were observed corresponding to the two kinds of bubble generators. One is characterized by the existence of a peak in void fraction near to the wall and the other on the center line of the pipe. The heat transfer coefficients for the former are about 20% higher than those of the latter.

1. ま え が き

気流二相流における伝熱には、沸騰を伴ういわゆる沸騰流の伝熱と沸騰を伴わない空気・水系のような二成分系の伝熱とがある。これまでの二相流の伝熱に関する研究のほとんどが前者に属するもので、後者はきわめて少ない。これは工業上にみられる二相流の伝熱には相変化を伴う場合が圧倒的に多く、後者のような系での実際例が少ないためであろう。

このような背景があるにもかかわらず、あえて後者に着目した研究を行うのは次の理由によるものである。

気ほう流において流動機構に密接に関係しているはずの相分布特性が気ほう発生過程の微妙な相違によって大幅に異なることについての認識を深めることにある。これについて、たとえば相分布が既知であったとしても、半径方向の運動量輸送のメカニズム、特に壁面近傍のメカニズムをどのように考えればよいかという課題であ

る。測定の大困難さから、液速度分布と気ほうの複雑な挙動との関係については、まだ十分な理解が得られていない。このような流動機構の面からのアプローチのむずかしさを考え、これを伝熱機構の面から見直してみようとしたのが本研究の目的の一つである。

最初に述べたように、気液二相流の伝熱は沸騰流のそれが主として議論されているが、沸騰流における気ほうの存在、特にサブクール沸騰時の気ほう底層が強制対流伝熱の増進に果たす役割を理解する上において二成分系二相流に関する本研究結果の資するところは少なくないと思われる。

本実験では大別して2種類の気ほう発生方法（ポーラス管と毛細管）を用い、これによって実現された気ほう群による相異なる相分布が熱伝達係数にどのように影響するかを実験によって明らかにする。

2. 使用した記号

D : 管内径 m
 h_i : 液体の速度 $v = u_{i0}/(1-\hat{\alpha})$ に対応する单相流

* 宇部工業高等専門学校機械工学科

** 広島大学工学部機械工学科学生

*** 宇部興産会社

熱伝達係数 $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

h_{l0} : みかけの液体速度 u_{l0} に対応する液单相熱伝

達係数 $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

h_{TP} : 二相流の熱伝達係数 $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

L : 管軸方向の長さ m

Nu : ヌセルト数

Pr : プラントル数

$(-dP/dL)$: 圧力こう配 $\text{kg/m}^2/\text{m}$

q : 熱流束 $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$

R : 管半径 m

Re : レイノルズ数, $\hat{u}_l \cdot D/\nu_l$

r : 管中心からの距離 m

t : 温度 $^\circ\text{C}$

\hat{u}_l : 液体の速度, $u_{l0}/(1-\hat{\alpha}) \text{ m/s}$

u_{g0} : みかけの気体速度 m/s

u_{l0} : みかけの液体速度 m/s

y : 管壁からの距離 m

α : ボイド率

$\hat{\alpha}$: 管断面平均のボイド率

β : 気体体積流量比, $u_{g0}/(u_{g0}+u_{l0})$

ν_l : 液体の運動粘性係数 m^2/s

τ : せん断応力 kg/m^2

添字

b : バルク

in : 加熱部入口

out : 加熱部出口

w : 壁面

3. 実験装置および実験方法

実験装置の概要を図1に示す。水はオリフィス **O** を経たのち、鉛直に設置された整流部を通り入口温度を測定され、気水混合部 **M** に至る。一方、気体は浮遊式流量計 **F** を経て気水混合部へ導入される。ここで気ほう流が形成され、供試管内を上昇する。

供試管は鉛直に設置された円管で、内径16.9mm、全長3.1mである。加熱区間は長さ $L=970\text{mm}$ (SUS 304) で、この部分が交流電源 **TR** によって直接加熱される。管壁温度を測定するため加熱管の外壁には管軸方向に沿って14対のクロメル・コンスタンタン熱電対が取り付けられている。加熱区間の上流と下流側には流れの視察のためアクリル管を接続した。また、加熱区間の入口と出口には、断面内のボイド率と気ほうの通過ひん度分布を測定するために、L形の点電極プローブがそう入されている。針状プローブには0.2mmの白金線が用いられた。

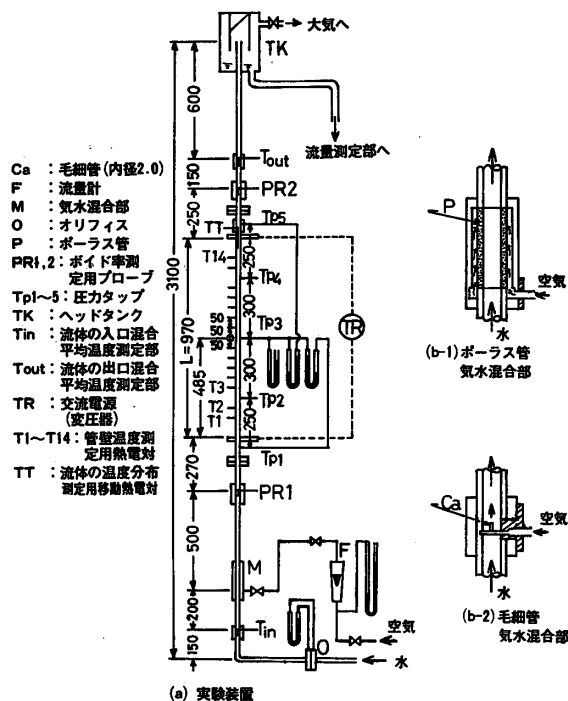


図1. 実験装置の概要

二相流体の半径方向温度分布を測定するために、加熱部出口から管内へシース熱電対(外径0.25mm)がそう入されている。その先端は点電極プローブと同様に上流側へ直角に曲げられ、加熱区間内へ約50mm入った断面内を半径方向に移動可能となっている。圧力こう配測定用の圧力タップは加熱区間の入口、中央部および出口の合計3箇所に取り付けた。

管の断面内相分布は気液混合部の構造の違いによって大きく相違する可能性があることが知られているので⁽¹⁾、同一水流量のもとでも相分布の著しく異なる気ほう流をつくる目的で、図1の(b-1)と(b-2)に示した2種類の気水混合法が採用された。図1の(b-1)は供試管の内径に一致したポーラス管を用い、管壁から管内へ気ほうを発生させる方法である。これに用いたポーラス管は長さが200mm、平均気孔寸法が4と70ミクロンの2種類である(以下にはこれらを記号 **P4** および **P70** で表わす)。同図(b-2)は供試管の中心に取り付けた内径2.0mmの毛細管を通して管の中心部へ気ほうを導入する方法である(以下にはこれを記号 **Ca** で表わす)。

おもな測定量は、熱流束 q 、加熱管の外壁温度、加熱区間の入口と出口における流体の混合平均温度 t_{in} , t_{out} 、流体の断面内温度分布、ボイド率分布、気ほうの通過ひん度分布および圧力こう配 $(-dP/dL)$ であ

る。

4. 実験結果

水単相流の測定結果を表1に、二相流（主として気ほう流領域）の測定結果を表2～表4にそれぞれ示した。表2は気水混合方法としてポーラス管 P₄（平均気孔寸法4ミクロン）を用い、一つの気・水の組合せに対して非加熱の場合と熱流束を $q=(1\sim 10)\times 10^4 \text{kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ の範囲で変化させた結果である。表3は毛細管 Ca（内径2.0mm）から空気を吹き込んだ場合の測定結果で、気・水流量組合せは表2とほぼ同じである。表4は表2および表3の流量組合せとほぼ同じであるが、水の入口温度が $t_{in}=20\sim 29^\circ\text{C}$ の測定結果で、ポーラス管の平均気孔寸法4と70ミクロンの2種を用いた場合と毛細管を用いた一例を含むものである。

4・1 ボイド率と気ほうの通過ひん度分布

4・1-1 非加熱時の分布

図2は加熱部出口断面において測定した非加熱時のボイド率 α と気ほうの通過ひん度 n の測定例である。図2(a), (b)および(c)はほぼ同一の気水流量 ($u_{go}\cong 1.0\text{m/s}$, $u_{go}\cong 0.30\text{m/s}$) のもとで気水混合部を3とおり変えたもので、(a)図は毛細管 Ca, (b)図は平均気孔寸法4ミクロンのポーラス管 P₄, (c)図は70ミクロンのポーラス管をそれぞれ用いた結果である。なお、実験においては測定断面における相分布の軸対称性を確認するために十文字方向に点電極プローブを移動し測定を行った。後出する断面平均ボイド率の算出にはこの4方向の測定値を用いた。

毛細管を用いて気ほうを発生させた場合 ((a)図) の α と n の分布は管の中心部でピークを示し、管壁に近づくにつれて急激に減少した形（コア気ほう流⁽²⁾ という）となっている。

これに対し、ポーラス管を用いて気ほうを発生させた場合 ((b)と(c)図) の分布はいずれも管壁の近くでピークを示し、管の中心部に極小値をもっていて、毛細管の場合の結果 (a) 図と比較して顕著な差異がある。このようにボイド率分布のピークの位置が管壁に接近している流れを底層気ほう流⁽³⁾ と呼び記号 **BL** で表わし、コア気ほう流は **Bc**, 両者の中間的分布をもつ流れには **Br** を用いて表わすことにする (表2～表4)。

ポーラス管の平均気孔寸法を4から70ミクロンに変わっても両者の間で相分布形はほとんど変化しない ((b)と(c)図)。その理由は二つの流れの気ほう群の寸法構成がよく類似しているためであろう。表5は、図2に対応

表1 水単相流

Run No.	u_{go} m/s	u_{io} m/s	t_{in} $^\circ\text{C}$	t_{out} $^\circ\text{C}$	q $\text{kcal/m}^2\cdot\text{h}$ $\times 10^4$	(-dp/dL) $\text{kg/m}^2/\text{m}$	α_{out}	t_w $^\circ\text{C}$	t_b $^\circ\text{C}$	h_{TP} $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}}$	Re	h_1 $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}}$	h_{ica1}	h_{ic} $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}}$	τ_w kg/m^2	flow regime
0-126	0.2564	6.2	33.4	9.40	1004.0	.....	80.44	23.88	.....	7978	1660	1482	.....	0.0147	.....
0-150	0.5091	8.7	20.78	9.40	1017.0	.....	60.34	16.58	.....	12650	2148	2325	.....	0.0718	.....
0-010	0.4626	7.6	22.50	10.23	1017.0	.....	61.78	17.30	.....	11760	2300	2170	.....	0.0718	.....
0-018	1.081	8.70	14.38	9.86	1083.0	.....	37.68	12.30	.....	20530	3886	3666	.....	0.351	.....
0-018	0.9263	7.35	14.55	10.11	1069.0	.....	41.49	12.03	.....	18200	3430	3300	.....	0.292	.....
0-150	1.828	8.90	12.00	9.07	1121.0	.....	27.47	10.92	.....	30290	5480	5156	.....	0.511	.....
0-010	1.709	7.76	11.90	9.03	1227.0	.....	27.46	10.45	.....	28040	5310	4865	.....	0.959	.....
0-010	0.4718	26.90	40.75	10.36	1016.0	.....	74.40	35.92	.....	15950	2692	2550	.....	0.0676	.....
0-010	1.090	25.80	32.55	9.52	1079.0	.....	52.00	30.20	.....	28340	4370	4358	.....	0.334	.....
0-010	1.092	24.50	30.60	9.05	1081.0	.....	48.80	28.46	.....	27140	4450	4269	.....	0.342	.....

表 2 気ほう流の実験データ (気水混合部: ポーラス管 P4, 水入口温度 $t_{in} = 6 \sim 10^\circ\text{C}$)

Run No.	u_{go} m/s	u_{io} m/s	t_{in} $^\circ\text{C}$	t_{out} $^\circ\text{C}$	q $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ $\times 10^4$	$(-dP/dL)$ $\text{kg}/\text{m}^2/\text{m}$	$\hat{\alpha}_{out}$ $^\circ\text{C}$	t_w $^\circ\text{C}$	t_b $^\circ\text{C}$	h_{TP} $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$	Re	h_1 $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$	Re_{10}	h_{10} $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$	τ_w kg/m^2	flow regime
P 4-114-126	0.1350	0.2638	6.2	32.9	10.58	738.2	0.325	43.81	23.62	5238	8790	1780	5936	1299	0.267	Bc
P 4-134-126	0.3433	0.2638	6.2	33.2	10.78	608.2	0.452	42.15	23.80	5877	10780	2103	5905	1299	0.254	S-B
P 4-290-138	0.08862	0.3815	10.14	10.14	.....	875.4	0.168	.....	.....	.....	5961	.....	4960	.....	0.183	Bc
	0.09081	0.3815	10.14	22.10	8.64	869.7	0.155	54.83	36.75	5550	12700	2244	10730	1961	0.104	Bc
P 4-113-148	0.1310	0.4793	7.85	22.62	10.25	847.8	0.210	39.24	17.50	4715	12490	2424	9807	1997	0.244	B _T
P 4-133-148	0.3265	0.4760	7.5	7.5	.....	724.5	0.379	.....	.....	.....	9253	.....	5746	.....	0.437	B _T
	0.3325	0.4836	7.92	22.6	10.21	708.5	0.402	35.25	17.51	5755	15730	2944	9420	1953	0.467	Bc
P 4-013-145	1.271	0.4483	10.14	10.14	.....	603.4	0.666	.....	.....	.....	17450	.....	5840	.....	1.138	F
	1.331	0.4607	10.14	22.10	8.64	502.0	0.650	30.45	18.01	6946	24500	4234	8570	1827	0.642	F
P 4-112-153	0.1300	0.5146	7.5	7.5	.....	876.0	0.198	.....	.....	.....	7746	.....	6212	.....	0.313	B _T
	0.1117	0.5387	6.72	6.72	.....	899.2	0.170	.....	.....	.....	7633	.....	6335	.....	0.292	B _T
	0.1169	0.5387	6.72	9.29	2.17	885.2	0.175	14.51	8.39	3547	8740	2011	7214	1724	0.254	B _T
	0.1183	0.5350	6.83	12.98	5.16	877.7	0.180	24.01	10.82	3911	10250	2197	8403	1874	0.244	B _T
	0.1202	0.5313	7.07	19.03	9.96	871.2	0.180	36.74	14.85	4551	12390	2439	10160	2081	0.216	Bc
	0.1318	0.5261	6.0	19.73	10.17	866.9	0.195	37.29	14.95	4552	12700	2480	10160	2074	0.262	Bc
P 4-130-154	0.2906	0.5350	6.28	6.28	.....	767.1	0.345	.....	.....	.....	9487	.....	6214	.....	0.474	B _T
	0.2945	0.5361	6.28	8.88	2.19	759.8	0.340	12.70	7.98	4629	10580	2364	6980	1695	0.422	B _T
	0.2942	0.5350	6.45	12.40	4.99	754.1	0.350	20.21	10.15	4957	12170	2559	7910	1813	0.440	Bc
	0.2966	0.5350	6.59	18.42	9.92	741.8	0.345	32.28	14.30	5519	14730	2840	9650	2075	0.367	Bc
	0.3319	0.5353	6.0	19.1	9.69	743.6	0.380	33.05	14.55	5240	15790	2992	9790	2042	0.522	Bc
P 4-283-198	0.08244	0.9753	6.30	6.30	.....	1054.0	0.075	.....	.....	.....	12250	.....	11330	.....	0.545	B _L
	0.08366	0.9782	6.30	12.87	10.08	1033.0	0.075	32.25	10.48	4629	18330	3410	16960	3205	0.459	B _T
P 4-111-198	0.1107	0.9808	8.5	8.5	.....	1044.0	0.093	.....	.....	.....	13440	.....	12190	.....	0.576	B _L
	0.1105	0.9808	8.5	9.13	0.969	1044.0	0.091	11.22	8.91	4194	13950	2951	12680	2734	0.570	B _L
	0.1108	0.9808	7.89	9.26	2.11	1036.0	0.095	13.67	8.78	4309	14420	3008	13050	2777	0.553	B _L
	0.1108	0.9808	8.15	11.14	4.60	1032.0	0.095	20.91	10.10	4253	16190	3205	14660	2960	0.537	B _L
	0.1106	0.9808	8.35	15.02	10.26	1021.0	0.092	34.47	12.70	4712	19650	3565	17840	3300	0.477	B _T
	0.1283	0.931	7.42	14.85	10.07	991.0	0.120	32.35	12.12	4978	18840	3471	16560	3130	0.469	B _T

表 2 (続き その1)

Run No.	u_{go} m/s	u_{lo} m/s	t_{lin} °C	t_{out} °C	q kcal/m ² h x10 ⁴	(-dP/dL) kg/m ² /m	α_{out}	t_w °C	t_b °C	h_{TP} kcal m ² h°C	Re	h_l kcal m ² h°C	Re _{lo}	h_{lo} kcal m ² h°C	τ_w kg/m ²	flow regime
P 4-113-011	0.1258	1.107	5.5	5.5	.....	1056.0	0.096	.....	.....	.....	13860	.....	12530	.....	0.642	B _L
	0.1278	1.085	5.90	12.7	10.51	1028.0	0.110	31.23	10.34	5030	20690	3770	18520	3450	0.583	B _T
P 4-130-198	0.2861	0.9808	6.71	6.71	.....	988.4	0.210	.....	.....	.....	14600	.....	11530	.....	0.838	B _L
	0.2933	0.9697	6.71	7.38	1.028	983.9	0.215	9.18	7.14	5039	15050	3186	11820	2626	0.840	B _L
	0.2998	0.9808	6.74	8.18	2.215	980.3	0.215	11.87	7.68	5284	16010	3304	12570	2723	0.825	B _L
	0.2860	0.9734	6.75	9.90	4.808	970.2	0.210	17.20	8.79	5717	17210	3423	13600	2836	0.761	B _T
	0.2863	0.9845	6.82	13.29	9.988	948.7	0.218	28.39	11.02	5750	20900	3833	16340	3148	0.704	B _C
	0.3289	0.931	7.45	14.80	10.20	915.3	0.255	29.20	12.12	5974	21480	3881	16000	3066	0.720	B _C
P 4-130-011	0.3139	1.085	7.5	7.5	.....	1002.0	0.232	.....	.....	.....	17050	.....	13100	.....	0.989	B _L
	0.3197	1.092	5.90	12.80	9.89	970.0	0.220	28.11	10.40	5587	23200	4165	18090	3414	0.803	B _C
P 4-155-198	0.5706	0.9734	8.0	8.0	.....	977.7	0.350	.....	.....	.....	18300	.....	11900	.....	1.385	B _L
	0.5556	0.9771	7.29	7.93	0.981	929.0	0.350	9.39	7.71	5837	18530	3745	12040	2653	1.179	B _L
	0.5610	0.9734	7.27	8.62	2.066	924.6	0.350	11.69	8.15	5836	19250	3824	12510	2709	1.160	B _L
	0.5655	0.9845	7.19	10.27	4.757	907.0	0.340	16.69	9.19	6343	20750	3982	13690	2855	1.044	B _T
	0.5399	0.9808	7.14	13.61	9.957	889.7	0.325	25.34	11.35	7117	23280	4212	15700	3073	0.907	B _C
P 4-163-193	0.6498	0.931	7.42	14.80	10.20	855.5	0.395	26.80	12.12	6948	25620	4509	15500	3016	1.058	B _C
P 4-163-010	0.6223	1.081	8.0	8.0	.....	952.1	0.359	.....	.....	.....	20620	.....	13220	.....	1.314	B _L
	0.6361	1.092	6.0	12.75	10.92	909.0	0.365	25.98	10.38	7002	27370	4806	17400	3345	1.158	B _C
P 4-010-010	1.069	0.998	5.84	5.84	.....	958.3	0.486	.....	.....	.....	22250	.....	11430	.....	1.877	B _C
	1.108	1.048	5.84	10.99	8.46	917.7	0.510	21.84	9.20	6700	32020	5505	15700	3113	1.807	F
P 4-110-016	0.1051	1.559	7.75	7.75	.....	1205.0	0.056	.....	.....	.....	20060	.....	18940	.....	1.103	B _L
	0.1052	1.572	7.75	11.79	9.95	1174.0	0.054	25.82	10.38	6446	26520	4682	25090	4479	0.963	B _T
P 4-128-016	0.2826	1.579	6.65	6.65	.....	1182.0	0.135	.....	.....	.....	21450	.....	18560	.....	1.339	B _L
	0.2843	1.573	6.65	7.54	2.18	1179.0	0.137	10.59	7.23	6482	22750	4404	19630	3914	1.335	B _L
	0.2816	1.579	6.70	8.74	5.04	1197.0	0.145	15.22	8.01	6988	24850	4639	21250	4093	1.445	B _L
	0.2884	1.576	6.82	10.82	9.88	1164.0	0.140	23.20	9.43	7175	27880	4933	23970	4371	1.280	B _T

表 2 (続き その 2)

Run No.	u _{go} m/s	u _{lo} m/s	t _{lin} °C	t _{lout} °C	q kcal/m ² h x10 ⁴	(-dP/dL) kg/m ² /m	α _{cont}	t _w °C	t _b °C	h _{TP} kcal m ² h ⁰ c	Re	h ₁ kcal m ² h ⁰ c	Re ₁₀	h ₁₀ kcal m ² h ⁰ c	τ _w kg/m ²	flow regime
P 4-155-016	0.5347	1.560	6.95	6.95	.....	1156.0	0.235	.....	.....	.....	24180	.....	18500	.....	1.652	B _L
	0.5425	1.553	6.95	11.13	10.18	1124.0	0.233	22.17	9.67	8143	30530	5310	23400	4292	1.508	B _T
P 4-010-016	1.036	1.642	5.92	5.92	.....	1238.0	0.321	.....	.....	.....	27750	.....	18840	.....	2.362	B _C
	1.033	1.687	5.92	9.26	8.84	1163.0	0.305	20.11	8.11	7370	35420	6019	24620	4499	1.977	F
P 4-110-018	0.1169	1.863	8.0	8.0	.....	1236.0	0.0585	.....	.....	.....	24200	.....	22780	.....	1.244	B _L
	0.1193	1.895	6.0	9.8	10.71	1219.0	0.0590	23.60	8.43	7062	30410	5293	28620	5042	1.175	B _L
P 4-130-018	0.1196	1.716	8.1	11.93	10.04	1227.0	0.0645	24.14	10.69	6905	29470	5081	27570	4817	1.232	B _L
	0.3325	1.858	5.8	5.8	.....	1205.0	0.157	.....	.....	.....	25170	.....	21220	.....	1.529	B _L
P 4-155-018	0.2946	1.865	6.0	9.8	10.55	1211.0	0.130	22.54	8.43	7488	32200	5552	27840	4942	1.441	B _T
	0.2957	1.716	8.11	12.02	9.99	1201.0	0.140	23.76	10.69	7643	31770	5413	27100	4769	1.441	B _T
P 4-155-018	0.5646	1.839	7.5	7.5	.....	1191.0	0.233	.....	.....	.....	28940	.....	22200	.....	1.791	B _T
	0.5819	1.858	6.0	9.75	10.97	1177.0	0.230	21.48	8.43	8405	35710	6064	27210	4879	1.720	B _C
	0.5835	1.716	8.14	12.35	10.24	1185.0	0.240	23.00	10.90	8463	36130	6021	26950	4762	1.796	B _C

B : 気ほう流
 BC : コア気ほう流
 BL : 底層気ほう流
 BT : 遷移層気ほう流
 F : フロス流
 S : スラッグ流

表 3 気ほう流の実験データ (気水混合物部: 毛細管 Ca, 水入口温度 $t_{in} = 7 \sim 17^\circ\text{C}$)

Run No.	u_{go} m/s	u_{lo} m/s	t_{in} $^\circ\text{C}$	t_{out} $^\circ\text{C}$	q kcal/m ² h $\times 10^4$	(-dP/dL) kg/m ² /m	α_{out}	t_w $^\circ\text{C}$	t_b $^\circ\text{C}$	h_{TP} kcal m ² h $^\circ\text{C}$	Re	h_1 kcal m ² h $^\circ\text{C}$	Re_{io}	h_{io} kcal m ² h $^\circ\text{C}$	τ_w kg/m ²	flow regime
Ca-113-150	0.1328	0.4803	16.6	16.6	.....	851.4	0.187	.....	.....	.....	9160	.....	7450	.....	0.162	B-C
	0.1372	0.5071	8.70	21.05	9.61	854.9	0.189	39.35	16.81	4263	12690	2452	10290	2073	0.185	B-C
	0.1313	0.4672	7.70	22.82	10.33	846.5	0.186	41.61	17.56	4295	12060	2335	9820	1981	0.137	B-C
Ca-133-150	0.3322	0.4978	13.35	13.35	.....	721.0	0.310	.....	.....	.....	10250	.....	7070	.....	0.131	B-S
	0.3432	0.5090	8.70	20.85	9.52	721.4	0.310	36.67	16.64	4753	14490	2749	10002	2043	0.133	B-S
	0.3349	0.4718	7.72	22.75	10.43	695.5	0.353	38.60	17.50	4931	14850	2787	9600	1955	0.205	B-S
Ca-113-010	0.1282	1.074	17.0	17.0	.....	1022.0	0.094	.....	.....	.....	18580	.....	16840	.....	0.490	B-C
	0.1260	1.077	8.70	14.55	10.03	1011.0	0.092	32.57	12.40	4972	21260	3820	19300	3536	0.393	B-C
	0.1274	0.929	7.35	14.90	10.19	978.0	0.103	34.60	12.15	4539	18800	3441	16990	3174	0.342	B-C
Ca-132-010	0.3219	1.081	16.8	16.8	.....	952.5	0.183	.....	.....	.....	20700	.....	16920	.....	0.572	B-C
	0.3244	1.081	8.70	14.53	9.95	948.5	0.185	29.64	12.35	5754	22910	4109	18680	3490	0.564	B-C
	0.3210	0.9313	7.45	15.10	10.34	899.4	0.218	31.42	12.30	5408	21050	3807	16460	3127	0.496	B-C
Ca-162-010	0.6231	1.089	12.75	12.75	.....	899.5	0.287	.....	.....	.....	21330	.....	15210	.....	0.788	B-S
	0.6323	1.077	8.78	14.57	9.87	898.0	0.277	28.03	12.45	6335	25280	4410	18270	3400	0.739	B-S
	0.6410	0.9313	7.48	15.20	10.48	818.0	0.347	30.03	12.40	5944	24850	4357	16230	3099	0.697	B-S
Ca-112-018	0.1202	1.839	17.2	17.2	.....	1211.0	0.0549	.....	.....	.....	30910	.....	29200	.....	1.124	B-C
	0.1184	1.858	8.80	12.15	9.95	1202.0	0.0550	26.01	10.96	6610	32100	5429	30340	5190	1.086	B-C
	0.1198	1.709	7.80	11.85	10.05	1187.0	0.0557	26.03	10.43	6442	29410	5075	27770	4847	1.025	B-C
Ca-130-018	0.2954	1.843	14.5	14.5	.....	1199.0	0.118	.....	.....	.....	30710	.....	27080	.....	1.339	B-C
	0.2937	1.858	8.80	12.05	9.82	1179.0	0.119	24.32	10.92	7326	33670	5679	29680	5134	1.259	B-C
	0.2945	1.716	7.85	11.85	10.05	1200.0	0.125	24.49	10.47	7168	31140	5332	27360	4808	1.373	B-C
Ca-158-018	0.5815	1.839	14.5	14.5	.....	1187.0	0.179	.....	.....	.....	32920	.....	27030	.....	1.546	B-S
	0.5794	1.846	8.80	12.07	9.71	1167.0	0.185	23.45	10.95	7765	36580	6071	29160	5064	1.487	B-S
	0.5823	1.716	7.85	11.93	11.93	1166.0	0.215	23.67	10.50	7669	34370	5785	26980	4766	1.610	B-S

表 4 気ほう流の実験データ (水入口温度 $t_{in}=20\sim 29^{\circ}\text{C}$)

Run No.	u_{go} m/s	u_{lo} m/s	t_{lin} $^{\circ}\text{C}$	t_{lout} $^{\circ}\text{C}$	q $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ $\times 10^4$	$(-dP/dL)$ $\text{kg}/\text{m}^2/\text{m}$	$\hat{\alpha}_{out}$	t_w $^{\circ}\text{C}$	t_c $^{\circ}\text{C}$	h_{rP} $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$	Re	h_l $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$	Re_{lo}	h_{lo} $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$	τ_w kg/m^2	flow regime
P 4-113-138	0.1252	0.3839	25.05	25.05	.....	836.6	0.220	.....	.....	.....	9310	.....	7265	.....	0.239	B _C
	0.1256	0.3839	25.05	41.17	9.70	822.9	0.203	53.03	34.95	5368	168.0	2840	10460	1940	0.109	B _C
P 4-130-140	0.3091	0.4049	24.20	24.20	.....	672.0	0.421	.....	.....	.....	13120	.....	7595	.....	0.393	B _C
	0.3140	0.4049	24.20	39.20	9.52	671.7	0.400	47.75	33.95	6903	17740	2998	10640	1990	0.303	B _C
P 4-165-140	0.6416	0.4047	25.18	25.18	.....	558.4	0.590	.....	.....	.....	18740	.....	7585	.....	0.627	B _C
	0.6525	0.4018	25.18	40.64	9.74	561.6	0.564	46.25	30.45	6180	22900	3730	9986	1920	0.531	S
P 4-113-148	0.1338	0.4774	26.78	33.27	5.07	851.8	0.210	39.93	31.01	5679	14090	2570	11130	2130	0.261	B _T
	0.1359	0.4756	26.85	40.75	10.60	844.3	0.210	53.47	35.92	6038	16680	2795	13180	2315	0.229	B _C
P 4-133-148	0.3392	0.4774	26.70	32.90	4.72	691.0	0.390	37.48	30.73	6994	17920	3140	10930	2110	0.342	B _C
	0.3321	0.4774	26.70	39.80	9.88	681.0	0.390	48.74	35.26	7326	20670	3370	12610	2270	0.300	B _C
P 4-290-172	0.0894	0.7208	25.43	25.43	.....	879.2	0.086	.....	.....	.....	15060	.....	13760	.....	0.147	B _L
	0.08821	0.7257	25.43	33.97	9.172	968.1	0.081	41.35	30.85	5253	18850	3180	17320	2970	0.207	B _C
P 4-111-172	0.1082	0.6910	24.40	24.40	.....	956.5	0.115	.....	.....	.....	14550	.....	12880	.....	0.302	B _T
	0.1126	0.7208	24.40	33.18	9.93	939.5	0.104	47.49	30.15	5725	20020	3336	17940	3056	0.184	B _C
P 4-131-172	0.3215	0.7356	25.11	25.11	.....	846.1	0.285	.....	.....	.....	19450	.....	13910	.....	0.554	B _C
	0.3032	0.7189	25.11	34.05	10.07	831.4	0.264	45.11	30.45	6881	23790	3855	17510	3020	0.403	B _C
P 4-160-172	0.6031	0.7253	25.18	25.18	.....	768.6	0.442	.....	.....	.....	24680	.....	13770	.....	0.890	B _C
	0.6112	0.7324	25.18	34.16	10.31	744.1	0.436	41.83	31.05	9583	31090	4815	17530	3045	0.761	B _C
P 4-113-010	0.1295	1.025	24.30	27.95	6.00	1017.0	0.110	36.05	26.67	6393	25110	4135	22350	3768	0.537	B _T
	0.1300	1.085	24.30	30.55	10.85	978.0	0.094	44.68	28.37	6654	28710	4520	26010	4175	0.304	B _T
P 4-132-010	0.3202	1.029	24.35	27.90	6.00	960.5	0.230	34.58	26.67	7582	28410	4626	21870	3752	0.805	B _T
	0.3194	1.066	24.40	30.75	10.74	950.7	0.237	42.15	28.52	7877	32570	5030	24850	4050	0.793	B _C
P 4-164-010	0.6372	1.085	24.55	27.30	4.78	900.6	0.360	31.89	26.32	8583	35070	5520	22440	3860	1.101	B _T
	0.6394	1.092	24.60	30.90	11.00	886.5	0.363	40.77	28.70	9109	39580	5910	25200	4120	1.054	B _T

表 4 (続き その1)

Run No.	u_{go} m/s	u_{lo} m/s	$t_{i in}$ °C	$t_{i out}$ °C	q kcal/m ² h x10 ⁴	(-dP/dL) kg/m ² /m	$\hat{\alpha}_{out}$	t_w °C	t_b °C	$\frac{h_{TP}}{kcal}$ m ² h ^{0c}	Re	$\frac{h_i}{kcal}$ m ² h ^{0c}	Re _{lo}	$\frac{h_{lo}}{kcal}$ m ² h ^{0c}	τ_w kg/m ²	flow regime
P 4-284-013	0.0840	1.250	24.05	24.05	.....	1098.0	0.062	.....	.....	.....	25020	.....	23470	.....	0.676	B _L
	0.0842	1.252	24.05	28.87	9.47	1087.0	0.060	41.10	26.90	6688	30340	4787	28520	4560	0.621	B _T
P 4-111-013	0.1125	1.248	26.15	26.15	.....	1091.0	0.082	.....	.....	.....	26260	.....	24100	.....	0.731	B _L
	0.1181	1.243	26.15	31.02	9.48	1078.0	0.079	37.40	28.00	8323	31330	4940	28860	4625	0.663	B _T
P 4-128-013	0.2809	1.304	22.70	22.70	.....	1073.0	0.165	.....	.....	.....	28080	.....	23440	.....	1.006	B _L
	0.2808	1.297	22.70	27.45	9.67	1045.0	0.150	37.63	26.25	8512	33490	5236	28470	4600	0.824	B _T
P 4-150-013	0.4880	1.223	23.01	23.01	.....	925.8	0.280	.....	.....	.....	30700	.....	22100	.....	0.870	B _T
	0.4900	1.315	23.01	27.70	9.67	1011.0	0.245	37.20	26.10	8714	39250	5546	29630	4430	1.082	B _C
P 4-157-018	0.5715	1.839	23.85	25.25	4.73	1159.0	0.233	29.74	24.77	9513	47730	7112	36610	5752	1.656	B _C
P 70-113-148	0.1389	0.4793	20.60	20.60	.....	853.8	0.195	.....	.....	.....	10220	.....	8224	.....	0.206	B _T
	0.1347	0.4793	29.55	37.90	5.51	844.3	0.205	44.49	34.47	5498	15320	2680	12180	2230	0.208	B _T
	0.1367	0.4867	29.55	44.20	11.05	837.6	0.192	58.40	39.05	5710	18020	2908	14560	2452	0.125	B _C
P 70-135-148	0.3351	0.4886	20.25	20.25	.....	714.5	0.360	.....	.....	.....	12970	.....	8300	.....	0.315	B _T
	0.3515	0.4867	29.40	35.20	5.71	687.3	0.395	42.49	33.17	6127	19650	3313	11890	2216	0.348	B _C
	0.3483	0.4458	29.70	47.00	11.86	673.6	0.410	56.92	40.95	7423	22800	3490	13450	2289	0.353	B _C
P 70-113-010	0.1309	1.055	20.80	20.80	.....	1033.0	0.095	.....	.....	.....	20100	.....	18190	.....	0.541	B _L
	0.1272	1.090	25.70	29.05	5.54	1032.0	0.101	36.61	27.88	6342	26740	4374	24050	4020	0.562	B _T
	0.1281	1.089	25.70	32.65	11.73	1022.0	0.095	47.80	30.20	6665	30120	4648	27270	4293	0.494	B _T
P 70-132-010	0.3200	1.092	25.73	29.05	5.55	967.0	0.220	35.26	27.89	7535	30610	4872	23870	3993	0.790	B _T
	0.3216	1.090	25.75	32.82	11.73	954.0	0.225	45.05	30.36	7985	34400	5185	26660	4228	0.756	B _C
P 70-165-010	0.6388	1.091	25.82	29.05	5.43	901.0	0.360	34.27	27.94	8577	36930	5690	23640	3983	1.103	B _T
	0.6497	1.089	25.80	32.60	11.46	887.0	0.340	42.12	30.23	9635	39210	5812	25880	4168	0.959	B _C
P 70-159-018	0.5856	1.815	25.75	27.80	5.40	837.2	0.230	32.34	27.08	10260	49550	7232	38150	5867	0.284	B _C
	0.5879	1.832	25.80	30.05	12.11	842.0	0.230	39.92	28.57	10670	54480	7643	41950	6200	0.304	B _C
Ca 111-195	0.1095	0.9567	24.35	24.35	.....	1012.0	0.103	.....	.....	.....	19870	.....	17830	.....	0.486	B _C
	0.1167	0.9270	24.35	30.70	9.23	967.0	0.099	44.38	28.50	5815	24630	4000	22190	3679	0.406	B _C

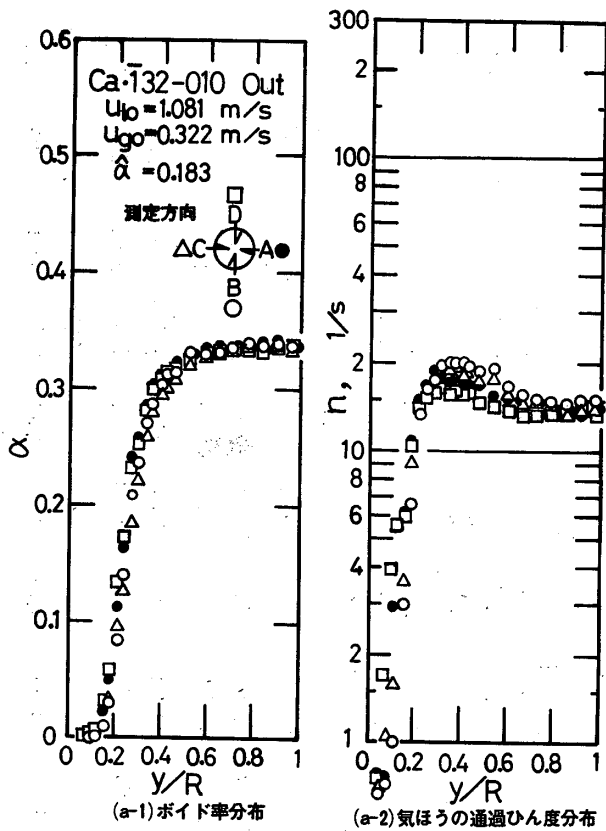


図2. ボイド率と気ほうの通過ひん度分布 (毛細管吹込み, 非加熱)

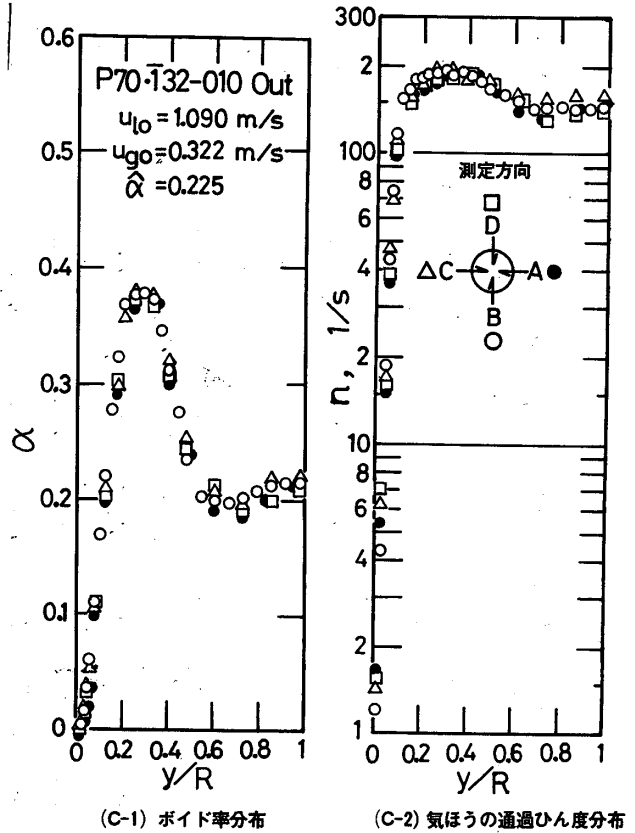


図2. 続き (ポーラス管 P4, 非加熱)

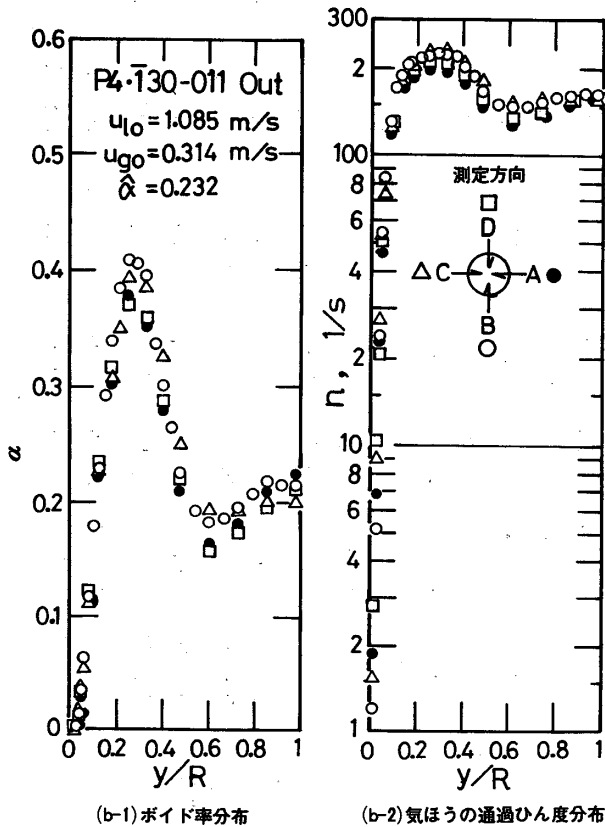


図2. 続き (ポーラス管 P70, 非加熱)

する流量組合せについて、世古口、福井らの気ほう群の寸法分布決定法⁽⁴⁾と写真観察から得られた気ほうの寸法を示したものである。

毛細管 Ca による気ほう発生法の場合には比較的大きな寸法の気ほう群 (気ほう直径: 6~10mm) がコア部を流れている。これに対してポーラス管による気ほう発生法の場合には比較的小さい寸法の気ほう (気ほう直径: 1.5~3 mm) が壁面の近傍を流動している。このように気ほう流という同一流動様式に属する流れにおいても大幅に異なる断面内相分布の実現しうることがわかってきたが、これは運動量ならびに伝熱の機構の記述にも反映されるべきものと考えられる。

4・1-2 加熱時の相分布

気ほう流の相分布は上述のように気ほうの発生方法の相違によって異なった形をとることが示された。その形成された相分布は加熱によって分布形が変化する場合と変化しない場合とが認められた。

図3はポーラス管によって気ほうを発生させた場合の底層気ほう流が熱流束 q によって相分布形を変えていく例を示したものである。熱流束の値が比較的小さい範囲 $q \leq 2 \times 10^4 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ では非加熱時の相分布形とは

表 5. 気ほう群の寸法分布 ($u_{10}=1.0\text{m/s}$, $u_{g0}=0.32\text{m/s}$)

y mm	y/R	P4・130-011 out		P70・132-010 out		Ca・132-010 out	
		r_{0m}	σ	r_{0m}	σ	r_{0m}	σ
8.45	1.0	1.60	0.78	1.80	0.78	3.0~5.0	—
4.98	0.59	1.31	0.84	1.31	0.92	—	—
2.48	0.29	1.01	0.69	0.94	0.74	—	—

r_{0m} は気ほう半径の中央値 mm, σ は気ほう半径の標準偏差⁽⁴⁾

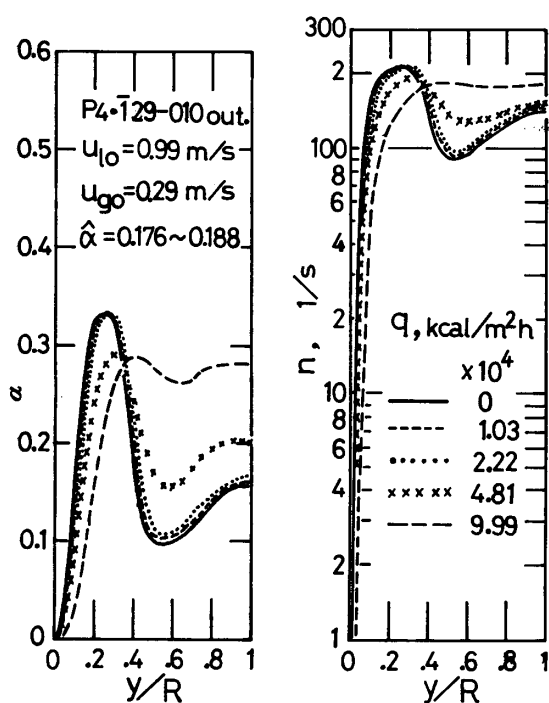


図 3. ボイド率と気ほうの通過ひん度分布に及ぼす熱流束の影響

ほとんど変わらない。しかし、熱流束の値が $5 \times 10^4 \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ ないしそれ以上になると、相分布形は影響され始め、 $q=10^5 \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ になると底層気ほう流であった流れがコア気ほう流へ移行している。このときの熱流束は気水の各流量によって影響されるがとりあえずこれを遷移熱流束と称しておく。

毛細管を用いて実現したコア気ほう流は加熱の有無によって加熱管出口断面の相分布形はまったく変化しなかった。

沸騰流の相分布形^{(5)・(7)}と本実験結果を比較すれば、サブクール沸騰の場合が底層気ほう流となっていてポーラス管によって気ほうを発生させた場合に類似している。

バルク温度が上昇して飽和沸騰流になると平均ボイド率の値が小さくても ($\hat{\alpha}=0.05\sim 0.16$)、相分布形は凸形の分布となってコア気ほう流を形成し、本実験の毛細管の場合の流れと類似している。

4.2 平均ボイド率

一断面内の4方向から測定したボイド率 $\alpha(r)$ を用い、次式で表わされる断面平均ボイド率 $\hat{\alpha}$ を図式積分によって算出した。

$$\hat{\alpha} = (2/R^2) \cdot \int_0^R r \cdot \alpha(r) \cdot dr \quad (1)$$

ここに R は管の半径、 r は管中心から半径方向への距離である。

図4は式(1)を用いて求めた平均ボイド率と次式で定義される気体体積流量比 β との関係を示したものである。

$$\beta \equiv u_{g0}/(u_{g0} + u_{10}) \quad (2)$$

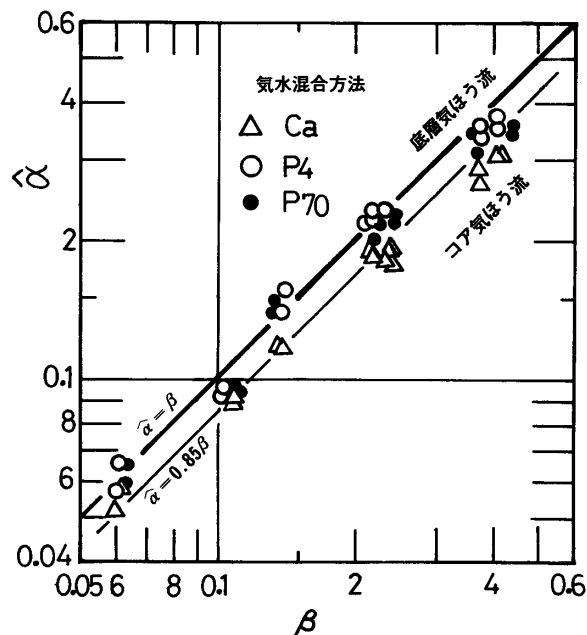


図 4. 気ほう流の断面平均ボイド率 $\hat{\alpha}$ と気体体積流量比 β との関係

ここに、 u_{go} および u_{lo} はそれぞれ気体および液体のみかけの速度である。

気水混合方法として、ポーラス管を用いて実現された底層気ほう流の $\hat{\alpha}$ の値は毛細管によって実現したコア気ほう流の値よりもいく分大きい。

前述のようにポーラス管による空気吹き込みではポイド率分布が壁面近傍にピークをもつ流れとなる。壁面近傍の気ほう速度は管中心部よりも低い値をとるために、断面平均で考えた気液間の相対速度は、気ほうの大部分が壁面近傍を通過する場合には減少傾向を示す。本実験の場合は、図4からわかるように $\hat{\alpha} \cong \beta$ とみなしうるから、相対速度はほぼ零ということになる。これに対して毛細管による空気吹き込みでは管中心部にピークをもつ流れとなり、相対速度は大きくなる傾向を示すことが考えられる。したがって $\hat{\alpha}$ は β よりも小さくなり、図4の示すところでは、 $\hat{\alpha} \cong 0.85\beta$ となっている。

4.3 熱伝達係数

水単相流の熱伝達係数を求め次式で示される Colburn

および h_i^* の値も記入してある。

表6は気ほうの発生条件いにかえれば相分布特性の相違が二相流の熱伝達係数 h_{TP} に与える影響を調べた一例であり、いずれもほぼ同一の流量条件下で得られたものを表2～表4から抽出したものである。 h_{TP} にみられる差異から判断して、コア気ほう流と底層気ほう流とで熱伝達過程が異なっていることがうかがえる。

相分布形と h_{TP} の差異とから次のことが指摘されよう。

(1)勝原ら⁽⁹⁾が指摘しているように、気相の混入によって液体速度が増加することによる効果 ($h_i - h_{i0}$) のほかに、液相が気相によって付加的に乱されることによる効果 ($h_{TP} - h_i$) が大きい。(2)同一流量条件におけるコア気ほう流と底層気ほう流の結果を比較すると、相分布特性が二相流の熱伝達係数 h_{TP} に与える影響は顕著で、底層気ほう流の h_{TP} の値がコア気ほう流の h_{TP} よりかなり大である。(3)気ほうの発生方法として平均気孔寸法の異なる2種類のポーラス管を用いた場合の h_{TP} の値

表6 相分布形と熱伝達係数の関係

気水混合法	Run No.	u_{go} m/s	u_{lo} m/s	q kcal/m ² ·h	t_{in} °C	h_i kcal/m ² ·h· °C	h_{TP} kcal/m ² ·h· °C	$\frac{h_{TP}}{h_i}$	相分布形	
毛細管 Ca	133-150	0.343	0.509	9.52×10^4	8.7	2749	4753	1.73	B _C	
ポーラス管	P4	133-148	0.333	0.484	10.21	7.9	2813	5755	1.95	B _L
			0.332	0.477	9.88	26.7	3440	7326	2.17	
ポーラス管	P70	135-148	0.348	0.446	11.86	29.7	3490	7423	2.13	B _L
毛細管 Ca	132-010	0.324	1.081	9.95	8.7	4109	5754	1.40	B _C	
ポーラス管	P4	130-198	0.329	0.931	10.20	7.5	3881	5974	1.54	B _L
		132-010	0.319	1.066	10.74	24.4	5030	7877	1.57	
ポーラス管	P70	132-010	0.322	1.090	11.73	25.8	5185	7985	1.54	B _L

B_C: コア気ほう流, B_L: 底層気ほう流

の式⁽⁶⁾から得られる値と比較しつつ実験を進めた。

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \quad (3)$$

なお、上式における液体の物性値は伝熱面温度 t_w と流体の混合平均温度 t_b との平均値に対する値を用いる。

加熱管には管軸に沿って14対の熱電対が取り付けられているが、温度的に十分発達した位置(加熱開始点から535～735mmの位置)にあるNo.8～No.12の5箇の測定値を平均した値によって熱伝達係数の議論を行う。

表2～表4中には測定された二相流の熱伝達係数 h_{TP} のほかに、みかけの水速度 u_{10} および水単相速度 $\hat{u}_1 = u_1 / (1 - \hat{\alpha})$ を用いて式(3)で算出した熱伝達係数 h_{10} お

にはほとんど差異がない。両者がいずれも、相分布形と気ほう群の寸法構成とにおいて類似しているためであると判断される。

4.4 流体の温度分布

供試管の加熱部出口から約50mm上流側の断面にそう入された熱電対によって流体の断面内温度分布を測定した。

図5と図6は得られた流体の温度分布を示したものである。ポーラス管を用いて実現された底層気ほう流においては、気ほう底層内の気ほうによって壁面近傍の温度分布が影響を受け、温度分布曲線に変曲点が認められ

る。このことは、サブクール沸騰において著者らの指摘した結果⁽⁹⁾と類似した現象である。

これに対して毛細管を用いて実現したコア気ほう流では温度分布曲線に変曲点を有するものはみられない。なお、図6中には水単相流における温度分布の測定値と計算値⁽¹⁰⁾とが示してある。

4・4 壁面のせん断応力

運動量と熱の移動現象を比較してみるために壁面のせん断応力を求めた。測定した圧力こう配 ($-dP/dL$) と平均ボイド率 $\hat{\alpha}$ から次式を用いて壁面のせん断応力 τ_w が算定できる。

$$\tau_w = \left\{ (-dP/dL) - r_l (1 - \hat{\alpha}) - r_g \cdot \hat{\alpha} \right\} \cdot \left(\frac{R}{2} \right) \quad (4)$$

ここに、 r_l および r_g は液体と気体の比重量で、 R は管

の半径である。

図7は式(4)を用いて計算した壁面のせん断応力 τ_w と $Re (= \{u_{10}/(1 - \hat{\alpha})\} \cdot D/\nu_l)$ の関係を示したものである。図中の三角印は毛細管 Ca を、丸印はポーラス管をそれぞれ用いた場合の値である。断面の相分布特性の相違が τ_w にも有意な差となって現われているようである。

また、 τ_w の値は同一の流量条件においても加熱の有無と熱流束の値の大小によって有意な差異が認められる。表2～表4を参照してわかるように、同一の流れを加熱すると τ_w は幾分小さくなり、 q の値が増加するにつれて τ_w の値は減少している。このことは、管内にそう入したピトー管で測定した液体の速度分布の差異からも符合するようである。ピトー管は内径0.8、外径1.2

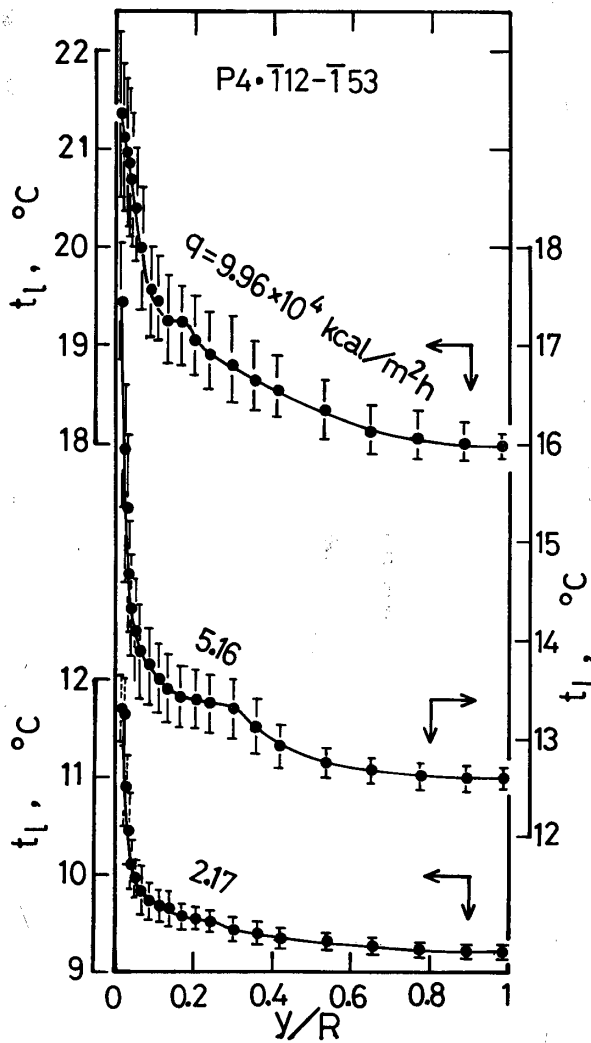


図5 断面内温度分布 (P4, 底層気ほう流)

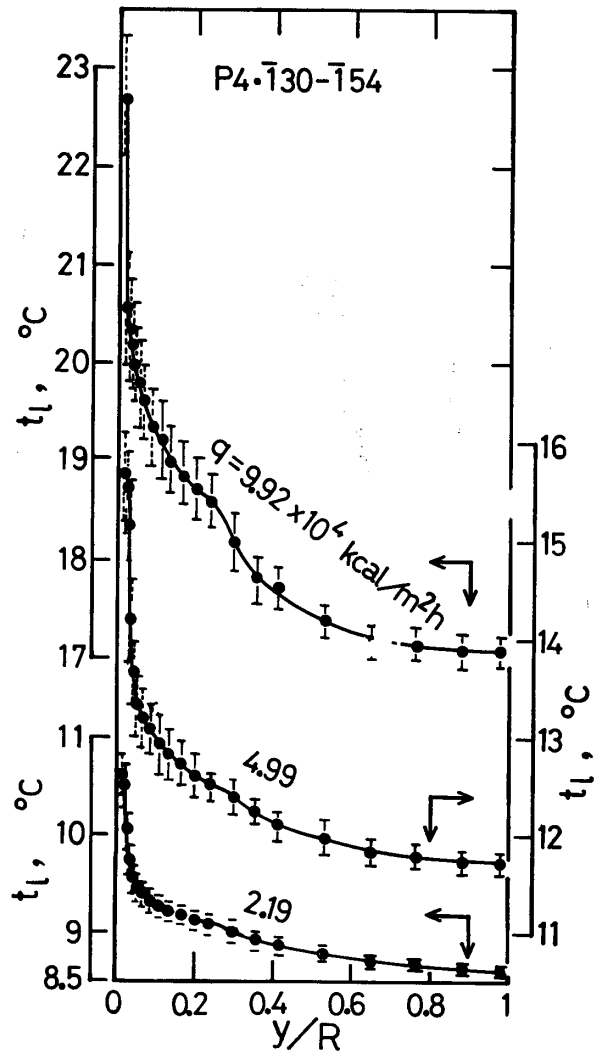


図5 続き (P4, 底層気ほう流)

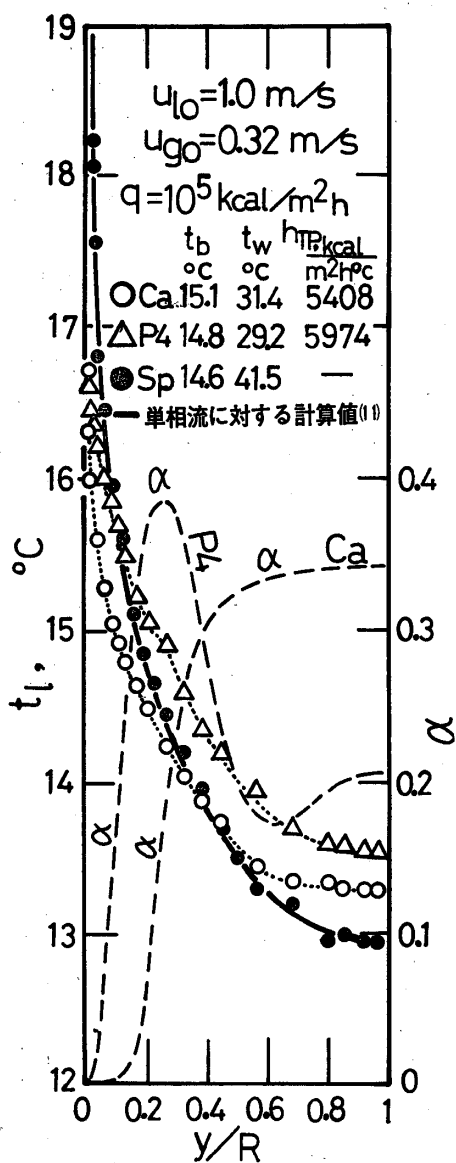


図6 流体の温度分布とボイド率分布

mmのもので壁面近傍の情報が得られなかったが、管中心部の速度分布は測定できる。その結果によると、管中心部の速度分布のこう配は熱流束を加えることによってわずかながら平坦になっている。

加熱面に接する液体の層内には急激な温度こう配が形成され(前出)ていて物性値変化が大きく、さらにこの層内に急激な速度こう配が成立していることが予想される。

5. むすび

垂直に上昇する気ほう流のボイド率分布は気ほうの発生方法を変えるだけで著しく異なったものになることが

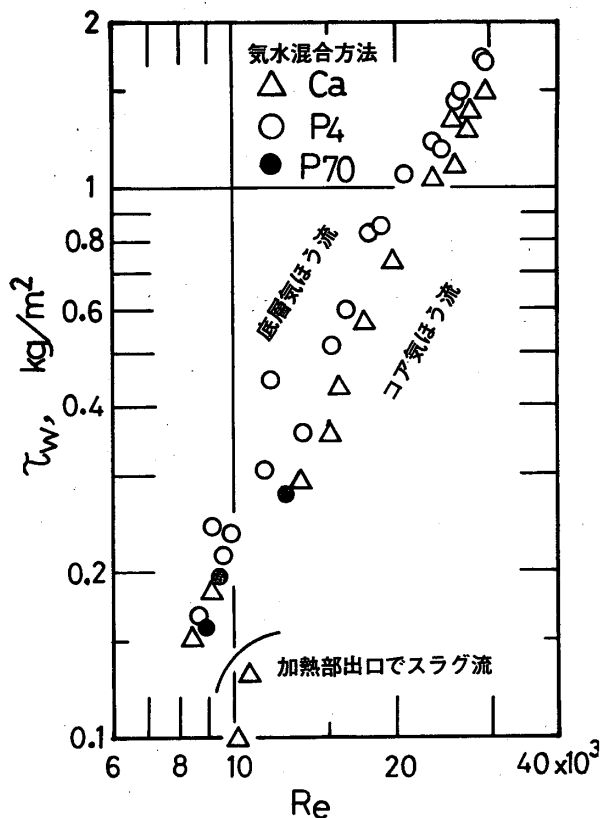


図7 壁面せん断応力 Tw 対 Re の関係

示された。このボイド率分布の変化が熱伝達係数にどの程度の差異となって現われるかを実験的に検討した。その結果を要約すると次のようである。

(1)気ほう底層を形成する流れ(底層気ほう流)と、大部分の気ほうがコア部を流動する流れ(コア気ほう流)との極端に相分布形の異なる二つの流れを実現し、二相流の熱伝達係数を測定した。その結果、断面内の相分布形の差異は熱伝達係数に影響を与えることがわかった。気水の各流量が同一の流れであっても、底層気ほう流の熱伝達係数はコア気ほう流のそれに比して15~20%程度大きな値となる。

(2)流体の温度分布を測定した結果、底層気ほう流では気ほう底層内の気ほうによって温度境界層が影響を受け、伝熱面近くの温度分布曲線に変曲点をもち、サブクール沸騰の温度分布曲線と類似の性質が認められた。この現象はコア気ほう流では認められなかった。

(3)底層気ほう流の相分布形は熱流束によって影響を受け、条件によってはコア気ほう流へと移行する。影響を及ぼす熱流束の値はおおよそ $10^5 \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ であり、 $2 \times 10^4 \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ ないしそれ以下の値ではほとんど影響を与えない。コア気ほう流の相分布形は熱流束の有無

によって全く影響を受けなかった。

終わりに、本研究を始めるに当り種々の御教示を戴いた世古口言彦教授（九大工），終始討論を戴いた佐藤泰生助教授（熊大工），田中収（九大工）の各氏に感謝する。また、本実験の遂行に協力された当時宇部高専学生金子高治，黒岩邦彦の両氏，装置の製作に御助力を戴いた実習工場の各氏に感謝する。実験データの計算には宇部高専電算機室を利用したのでここに謝意を表する。

文 献

- (1) 世古口ほか，機論，**40**—336（昭49—8），2295.
- (2) 世古口ほか，第12回伝熱シンポジウム講論，（昭50—5），385.
- (3) 世古口ほか，機論，**41**—346（昭50—6），1889.
- (4) 世古口ほか，機械の研究，**29**—2（昭52），17.
- (5) 西川ほか，第805回熱工学講論，（昭45—11），37.
- (6) 世古口ほか，第9回伝熱シンポジウム講論，（昭47—5），17.
- (7) 世古口ほか，第10回伝熱シンポジウム講論，（昭48—5），1.
- (8) Colburn, A. P., Trans. AICHE., **29** (1933), 174.
- (9) 勝原，風間，機論，**24**—144（昭33—4），228.
- (10) Sekoguchi, K., et. al., Proc. of the 5th Int. Heat Transfer Conference, **4** (1974), 180.
- (11) 甲藤好郎，伝熱概論，養賢堂（1969），115.